

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平5-72047

(43)公開日 平成5年(1993)3月23日

(51)Int.Cl.<sup>5</sup>  
G 0 1 J 11/00

識別記号

庁内整理番号  
8117-2G

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数6(全10頁)

(21)出願番号 特願平3-229249

(22)出願日 平成3年(1991)9月10日

(71)出願人 390014535

新技術事業団

東京都千代田区永田町2丁目5番2号

(72)発明者 五神 真

神奈川県横浜市鶴見区東寺尾1-19-14

(72)発明者 江馬一弘

東京都足立区綾瀬5-7-9 シティビル  
502

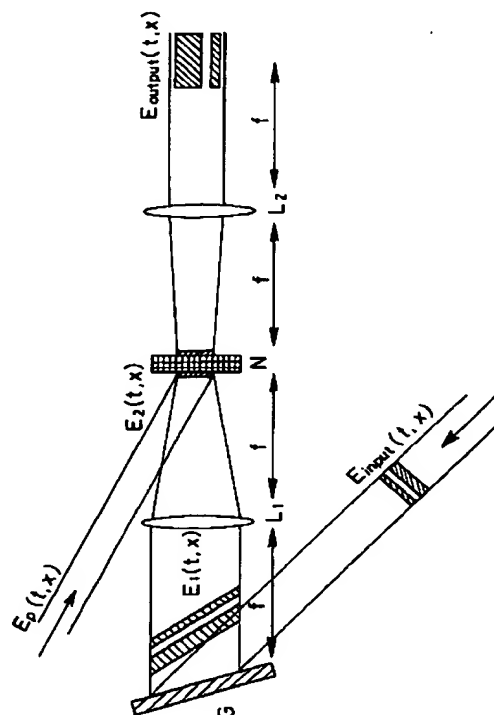
(74)代理人 弁理士 蛭川 昌信

(54)【発明の名称】 超高速光波形測定法

(57)【要約】

【目的】 時間分解能がエレクトロニクスに制限されず、安価で、プローブパルスの掃引を必要としない新しい原理に基づく、100fsから100psの光パルス等の超高速光波形測定法。

【構成】 測定時間波形を回折格子Gに入射させ、その0次以外の所定次数の回折光をレンズL<sub>1</sub>で空間的にフーリエ変換し、その位相項をプローブ光パルスと非線形物質N中で光混合させて消去し、位相項消去後、再びレンズL<sub>2</sub>で空間的にフーリエ変換して、測定時間波形をそれと相似の空間パターンとして読み出す。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 測定時間波形を回折格子に入射させ、その0次以外の所定次数の回折光を空間的にフーリエ変換し、その位相項をプローブ光パルスと非線形物質中で光混合させて消去し、位相項消去後、再び空間的にフーリエ変換して、測定時間波形をそれと相似の空間パターンとして読み出すことを特徴とする超高速光波形測定法。

【請求項2】 前記プローブ光パルスと非線形物質中で光混合が和周波光混合であることを特徴とする請求項1記載の超高速光波形測定法。

【請求項3】 前記プローブ光パルスと非線形物質中で光混合が4光波混合であることを特徴とする請求項1記載の超高速光波形測定法。

【請求項4】 前記プローブ光パルスを非線形物質へ入射させる前に別の回折格子に入射させ、その0次以外の所定次数の回折光を非線形物質へ入射させて4光波混合を行わせることを特徴とする請求項3記載の超高速光波形測定法。

【請求項5】 前記各空間的フーリエ変換を光学的に行うことを特徴とする請求項1から4の何れか1項記載の超高速光波形測定法。

【請求項6】 時間的シリアル光信号を空間的パラレル光信号に変換することを特徴とする請求項1から5の何れか1項記載の超高速光波形測定法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、超短光パルスのような超高速光波形の測定方法に関し、特に、100fsから100psの光パルスの波形が測定でき、このような高速シリアル信号をパラレル信号に変換して測定可能な超高速光波形測定法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】超短光パルスを発生させる技術は1980年代に急速に進歩し、現在ではサブピコ秒のパルスをチューナブルで安定して得ることができるようになっている。このような超短光パルスは、時間分解分光、非線形分光の光源として物理、化学等の分野に大きく貢献している。さらに、近年では、超短光パルスのパルス波形を自由に整形する技術も現れ始め、より高度な光計測手段としての応用へ道が開かれつつある。また、波形整形を利用して超短光パルスに情報を書き込めば、Tbits/s以上の光信号を生成することができるので、現在より数桁高速の光通信や光情報処理が実現する可能性もある。しかし、そのような高速の光信号を生成しても、それを読み取ることができなければ意味がない。現在の光検出器(PINフォトダイオード、アバランシェフォトダイオード等)の応答速度は、速いものでも数10GHzが限度であるから、Tbits/s以上の光信号を直接読み取ることはできない。

【0003】ピコ秒より速い領域で光の波形を読み取る

方法として、代表的なものには、ストリークカメラを用いる方法と、非線形相関法(SHGオートコリレーション、クロスコリレーション等)がある。前者は、光波形を直接測定できるという利点があるが、時間分解能力はピコ秒からサブピコ秒までであることと、非常に高価という欠点がある。後者は、時間分解能には問題はないが、プローブパルスを掃引する必要があるので、瞬時に読み取ることを要求する光通信等には適用されない。

## 【0004】

10 【発明が解決しようとする課題】本発明はこのような状況に鑑みてなされたものであり、その目的は、上記のような従来技術の欠点を解決して、時間分解能がエレクトロニクスに制限されず、安価で、プローブパルスの掃引を必要としない全く新しい原理に基づく超高速光波形測定法を提供することである。

## 【0005】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成する本発明の超高速光波形測定法は、測定時間波形を回折格子に入射させ、その0次以外の所定次数の回折光を空間的にフーリエ変換し、その位相項をプローブ光パルスと非線形物質中で光混合させて消去し、位相項消去後、再び空間的にフーリエ変換して、測定時間波形をそれと相似の空間パターンとして読み出すことを特徴とする方法である。

【0006】この場合、前記プローブ光パルスと非線形物質中で光混合は、和周波光混合である場合、及び、4光波混合である場合があるが、4光波混合の場合、前記プローブ光パルスを非線形物質へ入射させる前に別の回折格子に入射させ、その0次以外の所定次数の回折光を非線形物質へ入射させて4光波混合を行わせるようにすることもできる。また、各空間的フーリエ変換は光学的に行わせることができる。

【0007】なお、この超高速光波形測定法は、時間的シリアル光信号を空間的パラレル光信号に変換するのに適用できる。

## 【0008】

【作用】本発明においては、測定時間波形を回折格子に入射させ、その0次以外の所定次数の回折光を空間的にフーリエ変換し、その位相項をプローブ光パルスと非線形物質中で光混合させて消去し、位相項消去後、再び空間的にフーリエ変換して、測定時間波形をそれと相似の空間パターンとして読み出すので、時間波形を瞬時に読み取ることができ、時間分解能がエレクトロニクスに制限されず、安価で、プローブパルスの掃引を必要としないものである。この方法により、100fsから100psの光パルスの波形が測定できる。

## 【0009】

【実施例】本発明の超高速光波形測定法は、基本的には、波形整形技術の逆過程を利用することにより実現される。以下にまずその原理について説明する。

【0010】ピコ秒より速い光波形は、光検出器を用いて直接時間波形を電気信号として測定することはできないので、本発明においては、時間波形を空間パターンに変換して光の空間パターンとして読み取る方法をとる。この方法は、回折格子を用いて時間波形を空間に投影し、その空間パターンをフーリエ変換面上で非線形光混合することで固定して、読み取るというものである。図\*

$$E_{\text{input}}(x, t) = R(x) U(t) \quad \dots (1)$$

とする。U(t)が測定したいパルス波形である。このパルスが回折格子Gに当たると、1次の回折光は回折格

$$E_1(t, x) = R(sx) U(t - \alpha x) \quad \dots (2)$$

ここで、xは光の進行方向に垂直で紙面に平行な空間座標、 $\alpha$ とsは回折格子の溝間隔と入射角で決まる回折パラメーターである。なお、ここで、 $t \rightarrow t - \alpha x$ に変換されるのは、図1に示すようにパルスが回折光の進行方向に対して傾いていることを表している。回折格子Gの隣合った溝から回折される光は、波長の長さだけ光路長が異なるので、図1に示したように回折されたパルスは★

$$E_2(t, x) \propto R(st/\alpha) V(2\pi x/\alpha \lambda f) \times \exp(-i 2\pi x t/\alpha \lambda f) \quad \dots (3)$$

となる。ここで、 $V(\Delta\omega)$ はU(t)のフーリエ変換である。E<sub>2</sub>(t, x)は、被測定波形のフーリエ変換と位相項 $\exp(-i 2\pi x t/\alpha \lambda f)$ の積になって☆

$$E_3(t, x) \propto R(st) U(t + \alpha x) \quad \dots (4')$$

となる。これは(2)式と傾きが逆になっているだけで、何も分からない。

【0014】そこで、この位相項 $\exp(-i 2\pi x t/\alpha \lambda f)$ ◆

$$E_{\text{output}}(t, x) \propto R(st/\alpha) U(\alpha x) \quad \dots (4)$$

となる。(4)式をみると、入射パルスの時間波形U(t)がx軸に投影されていることが分る。すなわち、時間波形が時刻によらず同じ位置に投影されるので、時間積分して空間パターンを観測すると、時間波形と相似のパターンが得られる。

【0015】位相項 $\exp(-i 2\pi x t/\alpha \lambda f)$ を消すには、それと複素共役の位相項を持った光電場と非線形物質N中で光混合させればよい。図1の場合は、そのための光をE<sub>r</sub>(t, x)と表している。E<sub>r</sub>の作り方はいくつか考えられるが、ここでは、2次と3次の非線形性を利用したものだけについて述べる。

【0016】図2(a)に2次の非線形性を利用する場合の配置を示す。被測定波形に比べてずっと短いパルスを回折格子G<sub>1</sub>とレンズL<sub>1</sub>でフーリエ変換したものをE<sub>r</sub>とし、E<sub>2</sub>との和周波混合光E<sub>r</sub>E<sub>2</sub>をフーリエ逆変換して空間パターンを得る。回折格子G<sub>1</sub>とレンズL<sub>1</sub>は、被測定波形に用いたものと同じパラメーターを持つものを用い、回折する方向を逆にすれば、E<sub>r</sub>は位相 $\exp(+i 2\pi x t/\alpha \lambda f)$ を持つので、上記位相項はキャンセルする。

【0017】図2(b)に3次の非線形性を利用する場合の配置を示している。2次の非線形性を利用する場合と同

\* 1にその原理図を示す。以下、時間波形が空間パターンとして読み出される過程を詳しく追って行く。

【0011】被測定光パルスの時間波形をU(t)とする。簡単のため、被測定光パルスの空間パターンは十分に広い範囲で一様な関数R(x)とする。すなわち、入射パルスを

※子直後では次式のように表される。

【0012】

★傾き、時間波形が各時刻でx軸に投影されている。t→t- $\alpha x$ に変換されるのがこのことを表している。ただし、図1から分るように、投影される位置が時刻と共に移動するので、この段階で時間積分して空間パターンを観測しても時間波形を知ることはできない。

【0013】次に、この光電場を焦点距離fのレンズL<sub>1</sub>を用いて空間的にフーリエ変換すると、焦点面では、

☆いるが、これをそのままレンズL<sub>2</sub>でフーリエ変換すると、

◆/ $\alpha \lambda f$ )を消去して、再びレンズL<sub>2</sub>でフーリエ変換すると、

じように、被測定波形に比べてずっと短いパルスを回折格子G<sub>2</sub>とレンズL<sub>2</sub>でフーリエ変換したものをE<sub>r</sub>とし、4光波混合光E<sub>r</sub>E<sub>2</sub>E<sub>2</sub>\*をフーリエ逆変換して空間パターンを得る。このとき、E<sub>r</sub>に用いる回折格子G<sub>2</sub>の溝間隔を被測定波形に用いた回折格子Gに比べて半分のものにするか、又は、焦点距離2fのレンズL<sub>2</sub>を用いれば、E<sub>r</sub>の位相因子はE<sub>2</sub>の半分になるので、上記位相項はキャンセルする。

【0018】図2(c)では、もっと簡単に、短パルスをそのままE<sub>r</sub>とし、E<sub>2</sub>との4光波混合光E<sub>r</sub>E<sub>2</sub>E<sub>2</sub>\*をフーリエ逆変換している。すなわち、非常に短いパルスでE<sub>2</sub>の一部分を切り出して読むことで、前記位相項を無視してしまうという方法である。この方法は、E<sub>2</sub>の一部分しか使わないので、効率が悪そうに思えるが、E<sub>r</sub>として短パルスをそのまま使うので、ピークパワーが大きくなり、4光波混合光E<sub>r</sub>E<sub>2</sub>E<sub>2</sub>\*は図2

(b)の場合よりも強くなる。また、光学系もミラーMを用いるだけで非常に単純になる。

【0019】以上に述べた方法で、理想的には(4)式に表されるように、被測定波形の相似形が空間パターンとして得られることになるが、実際の系では、いくつかの要因が波形測定の精度を落としている。以下、その要

因と対策をまとめておく。

【0020】1) 被測定パルスの空間広がり時間が時間幅に光速  $c$  を掛けたものに比べて十分大きい範囲で一様であるという仮定が(2)式から(3)式を導くのに使われている。実際には、空間広がり(すなわち、ビーム径)は有限であるので、(3)式のフーリエ変換には、空間広がりを表わす関数  $R(x)$  の重みが付いたフーリエ変換となる。被測定波形の時間幅が  $100\text{ ps}$  以下ならば、回折格子面上でのビーム径を数  $\text{cm}$  とればこの影響は無視できるようになる。時間幅が  $100\text{ ps}$  以上になると、回折格子の大きさも有限であるため、この効果は無視できなくなり、波形測定の精度は落ちてしまう。

【0021】2) 実際に光混合する時には、光混合光と元の光を分離させるため、 $E_s$  と  $E_r$  はある角度をもって交わるようにする。このことが位相項のキャンセルを不完全なものとする。しかし、この影響は、 $100\text{ fs}$  ( $\text{fs}: 10^{-15}\text{ 秒}$ ) より長いパルスを測定する場合には、角度を  $10^\circ$  以下にしておけば問題にならないことが数値計算の結果より明らかになっている。

【0022】3)  $E_r$  を作るための短パルスは、 $\delta$  関数でなく有限の幅  $U_r(t)$  を持っているため、実際に得られる空間パターンは被測定波形の正確な相似形ではなく、 $U_r(t)$  とのコンボリューション  $U * U_r(\alpha x)$  となる。

【0023】以上まとめると、被測定波形が  $100\text{ fs}$  から  $100\text{ ps}$  の間にあり、それに比べて短いパルス  $U_r(t)$  を用意できれば、 $U_r(t)$  の幅の精度で時間波形を空間パターンとして読み取ることができる。このことは、超短光パルスを波形整形して得られる超高速光信号を、元の超短光パルスと光混合することで読み出せることを意味している。これは、光信号のシリアル→パラレル変換に相当し、以下に実例を示す。また、被測定波形よりも短いパルスが用意できない場合(モードロックされたパルス波形を知りたい場合等)には、被測定パルス自身を  $E_r$  として用いれば、パルス波形のコンボリューションや自己相関波形を知ることができる。その実例を後に述べる。

【0024】以下、波形測定の実例について述べる。図2(c)の配置で、 $E_r$  として被測定パルス自身を用いて波形を測定した例を示す。 $E_r, E_s, E_2^*$  の4光波混合を用いているので、物理的なメカニズムとしては、 $E_r$  と  $E_s$  で形成された動的回折格子  $E_r, E_2^*$  で  $E_s$  が回折されることになる。このとき、動的回折格子の緩和時間  $T_1$  の大きさによって、得られる空間パターンは異なる。緩和時間が被測定パルス幅よりずっと長ければ、入射光電場の自己相関関数に比例した信号が得られる。逆に、ずっと短ければ、パルスの3次の強度自己相関波形が得られる。いずれの場合も、パルス波形に対応した信号をリアルタイムで(SHG自己相関法のようにスキヤンの必要がなく)得ることができる。

【0025】図3に示す配置で、モードロック色素レーザー(ロードミン6G)より得られるピコ秒パルスのパルス波形を測定した。非線形物質Nとして、エタノール中濃度  $10^{-5}\text{ M/L}$  の色素溶液(DODCI)を厚さ  $1\text{ mm}$  のセルに入れたものを用いている。また、回折格子Gとして  $2400\text{ 本/mm}$  のものを用い、レンズ  $L_1$ 、 $L_2$  として焦点距離  $300\text{ mm}$  のシリンドリカルレンズを用いている。空間パターンはCCDカメラで観察した。図4に得られた空間パターンを示す。DODCIの緩和時間は測定するパルス幅よりずっと長いので、光電場の自己相関関数が得られている。図4の横軸はCCDカメラの位置を表しているが、対応する時間に換算してある。この方法では、必要なものは色素溶液とCCDカメラだけなので、非常に安価な超短光パルス測定システムとなる。

【0026】次に、本発明の方法を高速光信号のシリアル→パラレル変換に用いた例について説明する。前にも述べたように、超短光パルスを波形整形して情報を書き込めば、 $\text{Tbits/s}$  以上の容量を持つ光信号を生成することができる。しかし、それだけ高速の光信号を読み取れる光検出器が現在のところ存在しないので、時間波形を空間パターンに変換して読むことになる。すなわち、光信号のシリアル→パラレル変換を行う必要がある。このような目的に以上に述べた波形測定法を利用させることを考えると、非線形物質の緩和時間が問題になる。波形整形で生成することのできる信号の長さは  $100\text{ ps}$  程度までなので、伝送容量を最大にするには、 $100\text{ ps}$  の繰り返しでシリアル→パラレル変換を行う必要がある。すなわち、非線形物質の緩和時間は  $100\text{ ps}$  以下が要求される。その要求を満たす非線形物質として、GaAs基板上にエピタキシャル成長させたZnSe薄膜を用いた。

【0027】ZnSeは波長  $442\text{ nm}$  に励起子共鳴があり、温度  $9^\circ\text{ K}$  において大きな3次の非線形感受率( $\chi^{(3)} \sim 10^{-2}\text{ esu}$ )を持ち、生成される動的回折格子の緩和時間は  $20\text{ ps}$  程度であることが報告されている。膜厚  $2.4\text{ }\mu\text{m}$  のZnSeを用意し、反射型の4光波混合光  $E_r, E_s, E_2^*$  を用いてシリアル→パラレル変換を行わせた。

【0028】図5にそのための配置を示す。1つの超短光パルスから、図に示したように、 $35\text{ ps}$  離れた2つのプローブパルスとそれに同期した  $0.12\text{ THz}$  で  $3\text{ bit}$  のシリアル信号を作成した。光源の波長は、ZnSeの励起子共鳴にあわせて  $442\text{ nm}$  としている。また、ZnSe薄膜は、励起子共鳴効果を上げるために、 $9^\circ\text{ K}$  に冷やしている。4光波混合光  $E_r, E_s, E_2^*$  の空間パターンはCCDカメラで検出している。

【0029】CCDカメラで検出された空間パターンは、シリアル信号の波形に一致していることが確認された。図6に検出パターンの1例を示す。図の(c)は、

プローブパルス“a”、“b”がそれぞれシリアル信号“011”と“100”を読み出し、その和が検出されている（CCDカメラは時間積分した信号を検出するため、2つの信号の和となる。）。この時、プローブパルス“b”をなくせば、“011”信号だけ変換され、逆にプローブパルス“a”をなくせば、“110”信号だけ変換されているのが、図6（a）、（b）より分る。プローブパルスは変換のゲートパルスとして働き、その応答速度は35ps以下だということが分る。

【0030】このシステムを用いて変換のサイクルをどこまで速くとれるかを次のようにして評価した。1つのシグナルパルスとプローブパルスの組みに、時間遅れ $t$ だけ遅れてもう1つのプローブパルスを用意した。最初のシグナルパルスとプローブパルスが動的回折格子を形成するが、遅れてくる第2のプローブパルスが到着するまでにその動的回折格子は消えていなければいけない。そうしないと、第2のプローブパルスに同期したシグナル信号はないにもかかわらず、誤りの信号が得られてしまう。この誤り信号を、時間遅れを変化させて測定した結果を図7に示す。時間遅れが13ps以上では、誤り信号が観測されないことが分る。このことより、このシステムの変換サイクルは70GHz以上に及ぶことが確認された。

【0031】この評価で用いている超短光パルスは4psなので、シリアル信号として0.12THzにまでしか作成できなかったが、サブピコ秒パルスを使えば、THz以上の信号を数10GHzのサイクルで変換できる。

【0032】このシステムの変換効率、非線形物質中に形成される動的回折格子の回折効率によって決まる。3次の非線形光学効果を利用しているため、回折効率は入力する光の強度に依存する。上記の場合、その値は約0.1%であった。この値は決して大きいとは言えないが、光検出器（この場合：CCDカメラ）の感度に対しては十分である。

【0033】以上、波形整形法を利用したリアルタイム波形測定法について述べた。この方法は、100fsか\*

\*ら100psのパルスに対して有効であり、測定するパルスより短いプローブパルスを用意すれば、波形を空間パターンとして瞬時に読み取ることができる。また、プローブパルスとして被測定パルス自身を用いても、波形のコンボリューションや3次の相関波形が得られる。

#### 【0034】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の超高速光波形測定法によると、次のような効果が得られる。

1) 非線形物質として色素が使えるので、広範囲な波長に渡って、安価な波形測定システムとなる。

【0035】2) スキャンを必要とせず、単発現象の測定にも利用できる。

【0036】3) プローブパルスとして被測定パルス自身を用いても、得られる空間パターンは3次の相関波形なので、波形の非対称性も知ることができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の超高速光波形測定法の測定原理を説明するための原理図である。

【図2】位相項を消去するためのいくつかの配置を示す図である。

【図3】モードロック色素レーザーより得られるピコ秒パルスのパルス波形を測定するための配置を示す図である。

【図4】図3の配置により波形を測定した例を示す図である。

【図5】シリアル→パラレル変換のための配置を示す図である。

【図6】図5の配置による検出パターンの1例を示す図である。

【図7】図5の配置による変換サイクルの速度を評価するための測定結果を示す図である。

#### 【符号の説明】

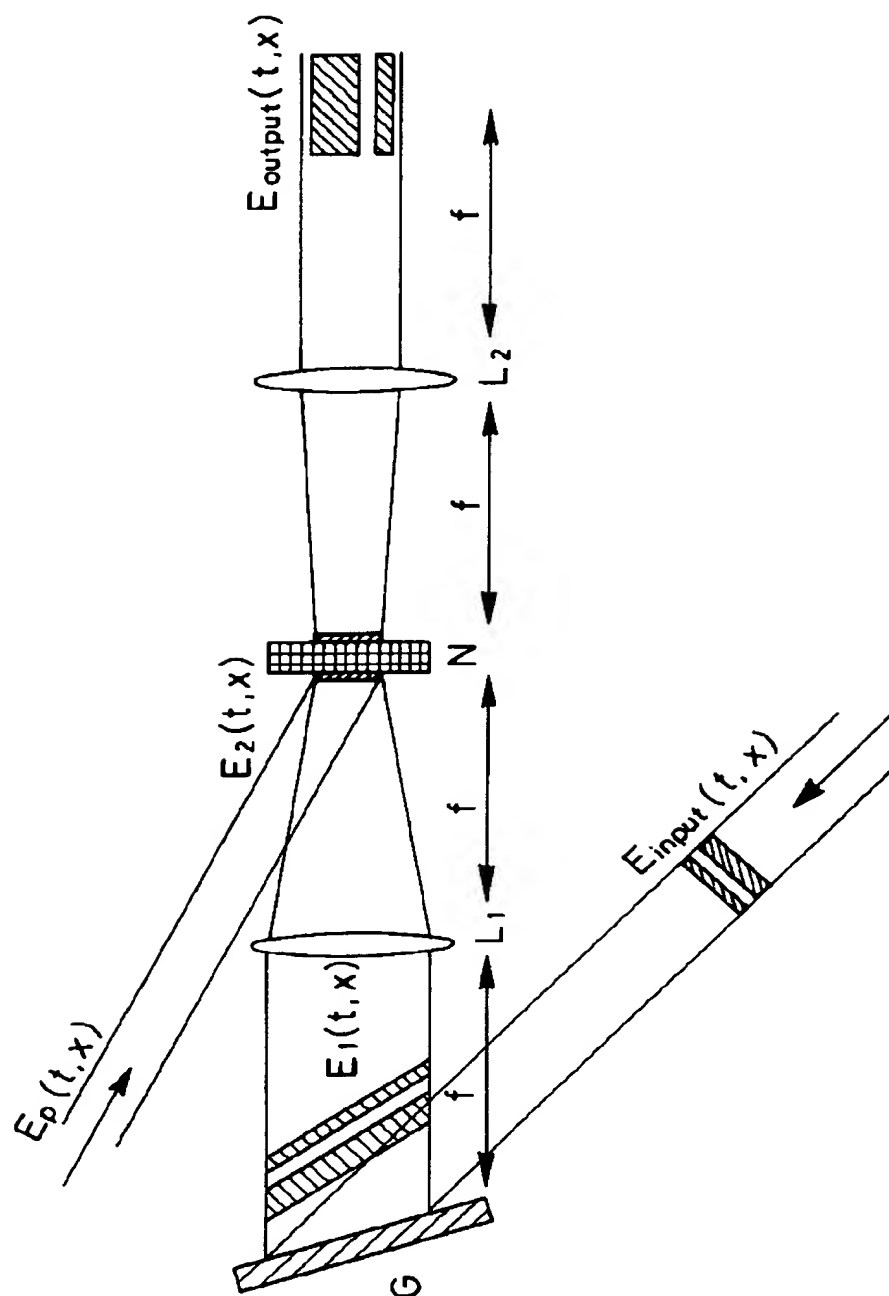
G、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>…回折格子

L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub>…レンズ

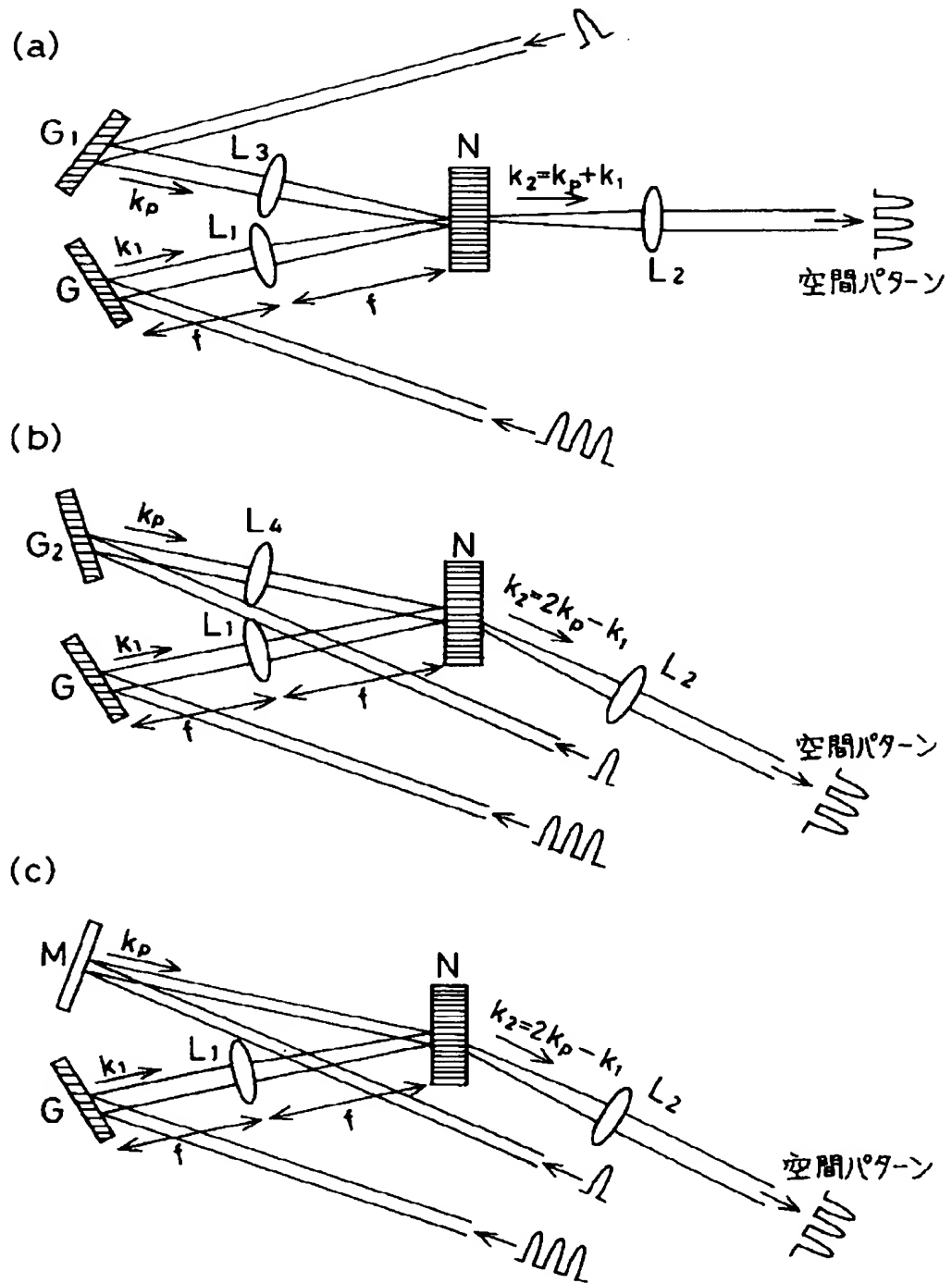
N…非線形物質

M…ミラー

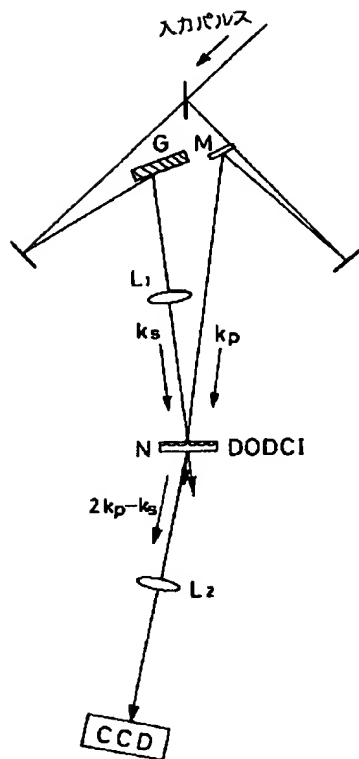
【図 1】



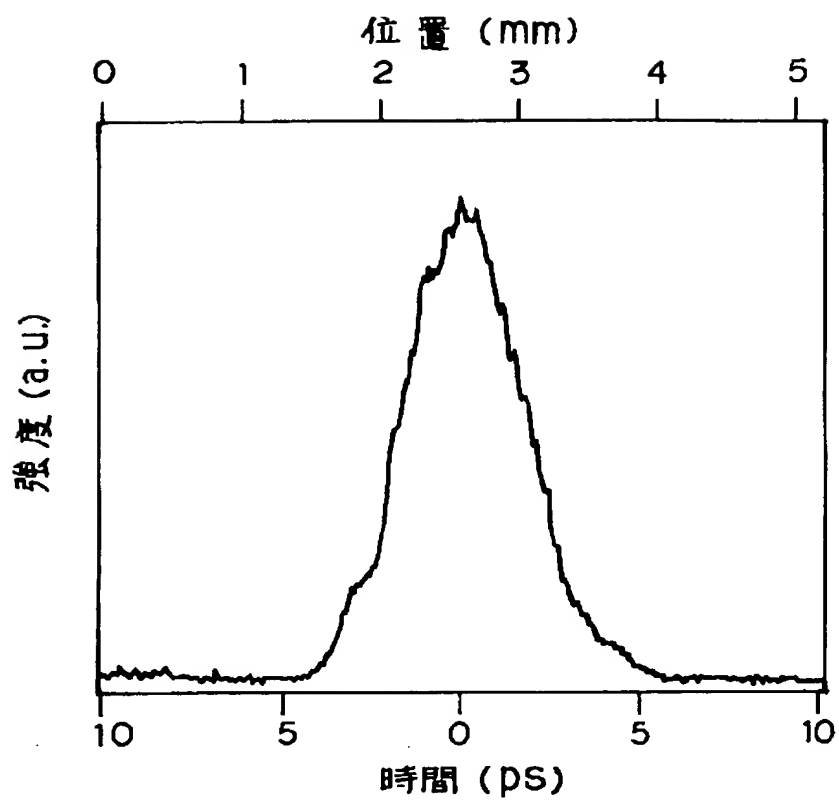
【図2】



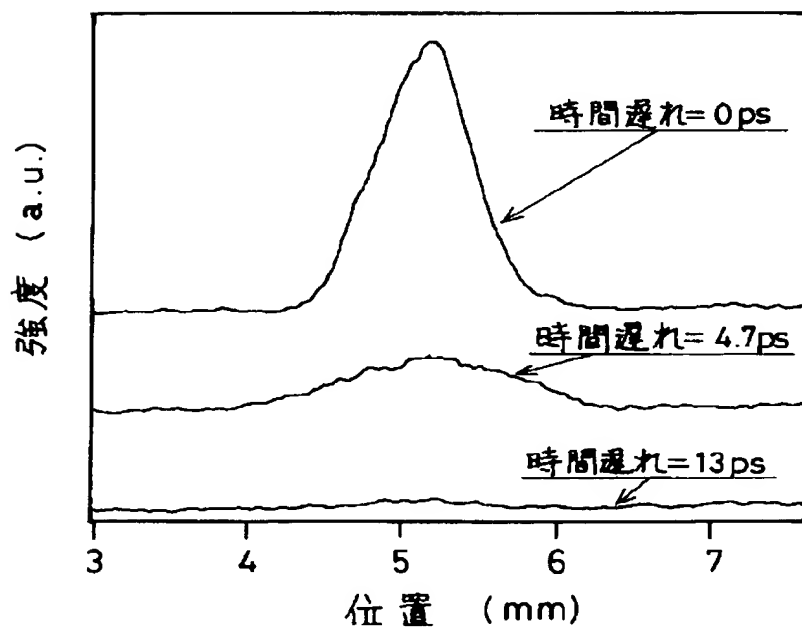
【図3】



【図4】

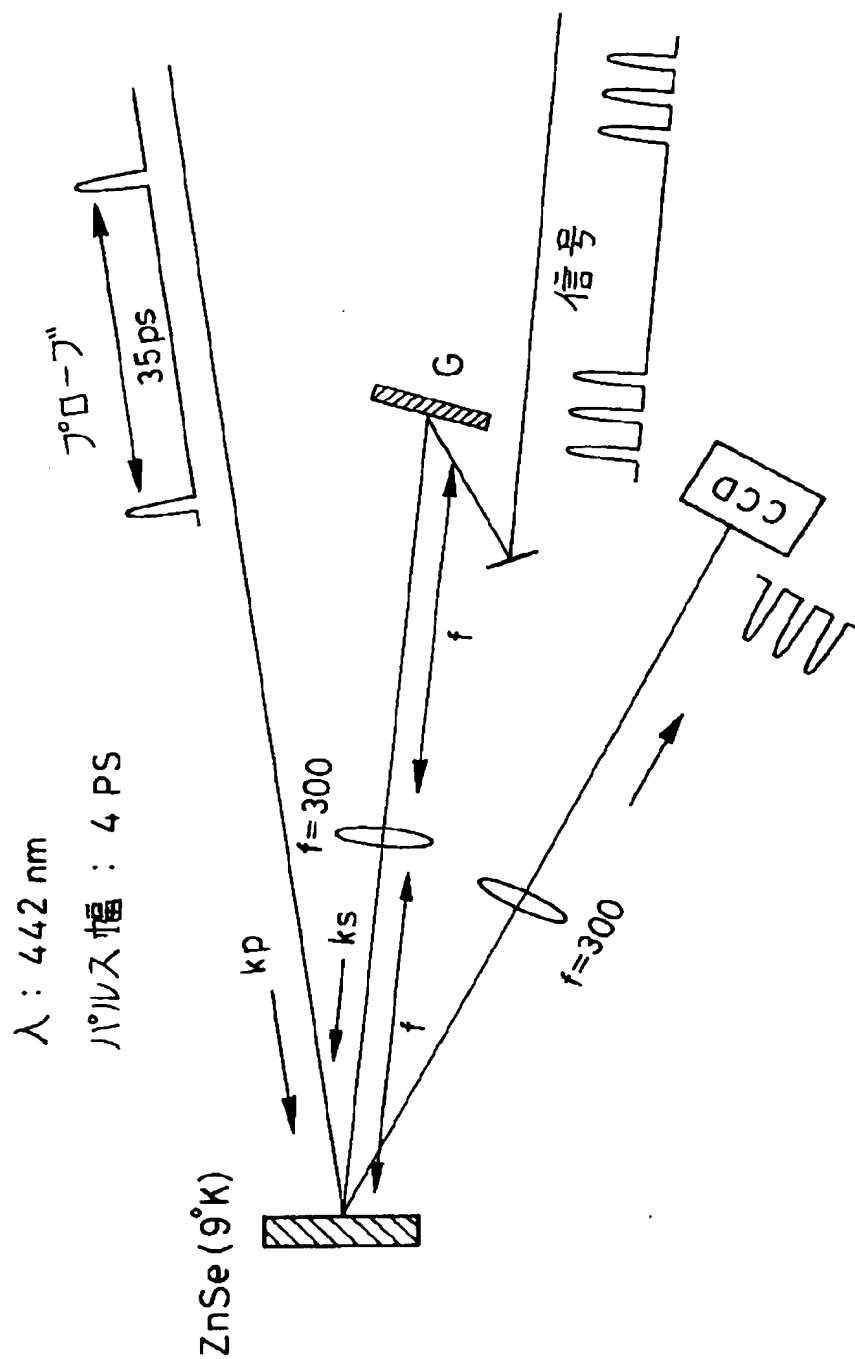


【図7】





【図 5】



【図6】

